

論技術科學

錢學森

(中國科學院力學研究所)

一、科學的歷史發展與技術科學概念的形

在人們從事生產的過程中，他們必然地累積了許多對自然界事物的經驗。這些經驗可以直接應用到生產上去，也可以先通過分析、整理和總結，然後再應用到生產上去。直接應用這一個方式是工藝的改進，是所謂工程技術，把經驗來分析、整理和總結就是自然科學*的起源。所以工程技術和科學研究只不過是人們處理生產經驗和對自然界觀察結果的兩方面，基本上是同一來源，而且兩方面工作的最終目的也是一樣的，都是為了改進現有的和創造更新的生產方法，來豐富人們的生活。

因此在科學發展的早期，我們不能把科學家和工程師分開來。一位物理學家也同時是一位工程師，牛頓就是一個著名的例子。牛頓不但發現了力學上的三大定律，因而奠定了理論力學的基礎，而且他也是一位結構工程師，他設計了一條在英國劍橋大學校址中的木結構橋，這橋據說至今還存在。再像歐拉，他是一個大數學家，同時他對工程結構的穩定問題上也作出了偉大貢獻。但是在十九世紀中，當科學在資本主義社會中得到了迅速的發展，科學家的確和工程師分手了。科學家們忙於建立起一個自然科學的完整體系，而工程師們則忙於用在實際工作中所累積了的經驗來改進生產方法。在歐洲的一些學者和科學家，對工程師是看不起的，認為他們是一些有技術，但沒有學問的人。而工程師們又認為科學家是一些不結合實際的幻想者。一般講來，兩方面的人缺乏相互之間的了解和合作。

當然，科學家和工程師分手這種現象，也是事實上的需要。每一方面的工作因發展而變得更複雜了，工作量也大了，要一兼顧，自然是不可能的。分工就成為必需的。但是這也不能完全解釋為什麼分工之後不能保持緊密的聯繫，其中必定有更深入的原因。我覺得這原因是：當時科學的發展還沒有達到一個完整體系的階段，自然科學的各部門中雖然有些部分是建立起來了，但另一些部分又確是模糊的，不明確的。這也就是說：當時的自然科學因為它自身還有不少漏洞，

還不是一個結實的結構，所以當時的自然科學還不能作為工程技術的可靠基礎，把工程技術完全建築在它的上面。例如：雖然熱力學早已搞得很明白了，可是熱力學的基本，也就是用分子的運動來解釋熱能現象的統計物理，就存在着許多困難。這些統計物理中的困難要等到量子力學的出現才能得到解決。就因為這些在自然科學中的缺陷，有一些純由理論所推論出來的結果顯然與事實不相符合，這也動搖了工程師們對當時自然科學的信心。所以我們可以完全了解在十九世紀中和二十世紀初年工程師們與科學家中間的隔膜。

但是在本世紀中自然科學的發展是非常快的，個別自然科學的部門在較早的年代也已經達到完整的階段，電磁學和力學便是兩個例子。而正好在這個時候電機工程和航空工程兩個嶄新的工程技術先後出現了。因為它們是當時的新技術，沒有什麼舊例和舊經驗可作準則。工程師們為了迅速地建立起這兩門技術就求助於電磁學和力學，用電磁學和力學作為電機工程和航空工程的理論基礎。這樣才又一次證明了自然科學與工程技術問題的密切關係，才指明了以前工程師們不重視自然科學的錯誤。而也就是在這個時代，物理學、化學等自然科學學科很快地發展成現代的科學，補足了它們以前的缺陷。所以在今天來看，我們對物質世界的認識，只要是在原子核以外，只要除開個別幾點，是基本上沒有問題了。在原子和分子世界中，有量子力學；在日常生活的世界里，有牛頓力學；在大宇宙的世界里，有一般相對論的力學。只有原子核內部的世界現在還沒有一定的看法。因此我們也可以說，對工程師說來，自然科學現在已經很完整了，它已經是一切物質世界（包括工程技術在內）的可靠基礎。

由這個事實出發，有許多科學家認為：一切工程技術可以看作是自然科學的應用，而一個工程師的培養只要在他的專門業務課程之外，再加上自然科學就行了，就可以保證他在以後工作中有解決新問題和克服困難的能力。在四十幾年前的美國，他們的确是這樣看法。有名的麻州理工學院就是建立在這個原則上的。把工程師的培養和技術員的培養分開來，把工程師作為一個科學的應用者，這在當時是一個帶有革命性的改革。這個改革在一定程度上是成功的，而這種

* 在這裡，自然科學這一名詞是用來包括數學、物理學、化學、以及生物學、地質學等科學。但是自然科學不包括工程技術。

培养工程师的方法也就被其他学校和其他國家中的工程技术学校所採用，逐漸成为一种典型的工程技术教育。由这种課程所培养出來的工程師比起老一輩的工程師來，的确有科学分析的能力，在許多困难的問題上不再完全靠經驗了，能用自然科学理論來幫助解決問題。但这不过在一定程度上如此，至于課程改革原來的目的：把工程技术完全建立在自然科学的基礎上的这个目的，是沒有完全實現的。我們先看一看課程的組成。这种課程是四年制，前兩年着重在自然科学，后兩年着重專門業務。但是這兩部分之間沒有能結合起來。有人說以这个办法受教育的学生，前兩年他是一个学者，追求着自然界的真理，运用理論的分析而且做嚴密的實驗，确是在高度學術空气中生活着的。但是一过了兩年，進入了后一階段的教育，他又忽然从學術空气中被赶出來，進入了工程師們所習慣的園地，放棄了分析方法，去研究經驗公式了。我們知道这样培养出來的工程師一進入到实际工作中，不久就把他們学过的自然科学各个学科的大部分都忘了，数学也不大会用了，只不过还会运用自然科学的一般原則來幫助他們的思考罢了。要真正以科学的理論來推演出他們在工作中所需要的准則，他們还是不能做到的。

其实这一种困难是可以理解的。因为美國麻州理工学院对工程技術的看法是有錯誤的地方的。錯誤在什么地方呢？我們可以这样看：自然科学的研究对象並不是大自然的整体，而是大自然中各个現象的抽象化了的、从它的环境中分离出來的东西。所以自然科学的實質是形式化了的、簡單化了的自然界。因此，虽然关于原子核以外的世界：現在已經發現了許許更多的自然規律，但究竟自然科学还是要不断的發展的。在任何一个时代，今天也好，明天也好，一千年以后也好，科学理論决不能把自然界完全包括進去。总有一些东西漏下了，是不屬於当时的科学理論体系里的；总有些东西是不能从科学理論推演出來的。所以虽然自然科学是工程技術的基礎，但它又不能够完全包括工程技術。如果我們要把自然科学的理論应用到工程技術上去，这不是一个簡單的推演工作，而是一个非常困难、需要高度创造性的工作。我們說科学理論应用到工程技術上去是不合適的，應該更确切地說科学理論和工程技術的綜合。因此有科学基礎的工程理論就不是自然科学的本身，也不是工程技術本身；它是介乎自然科学与工程技術之間的，它也是兩個不同部門的人們生活經驗的总和，有組織的总和，是化合物，不是混合物。

顯然，我們不可能要求一个高等学校的学生僅僅用四年的功夫把这个非常困难的工作做好。他們最多只不过能把科学和工程混在一起，决不能讓兩者之間

起化合作用，所以美國麻州理工学院式的教育决不能完全达到它预期的目的，要作綜合自然科学和工程技術，要產生有科学依据的工程理論需要另一种專業的人。而这个工作內容本身也成为人們知識的一个新部門：技術科学。它是从自然科学和工程技術的互相結合所產生出來的，是为工程技術服务的一門學問。

由此看來，为了不断地改進生產方法，我們需要自然科学、技術科学和工程技術三个部門同时並進，相互影响，相互提攜，决不能有一面偏重。我們也必須承認这三个領域的分野不是很明晰的，它們之間有交錯的地方。如果从工作的人來說，一人兼在兩個部門，或者甚至三个部門是可以的；那末一个技術科学家也可以同时是一个工程師；一个物理学家也可以同时是一个技術科学家。不但如此，这三个領域的界限不是固定不移的，現在我們認為是技術科学的东西，在一百年前是自然科学的研究問題，只不过工作的方法和着重是有所不同罢了。我們要明确的是：在任何一个时代，这三个部門的分工是必需的，我們肯定地要有自然科学家，要有技術科学家，也要有工程師。

二、技術科学的研究方法

既然技術科学是自然科学和工程技術的綜合，它自然有不同于自然科学，也有不同于工程技術的地方。因此，研究技術科学的方法也有些地方不同于研究其他学科的方法。

因为技術科学是工程技術的理論，有它的嚴密組織，研究它就离不了作为人們論理工具的数学。这个工具在技術科学的研究中是非常重要的，每一个技術科学的工作者首先必須掌握数学分析和計算的方法。也正因为如此，某一些技術科学的發展，必定要等待有了所需的数学方法以后才能進行，例如近几十年來統計数学的成就就使得好几門技術科学（例如控制論和运用学）能够建立起來，所以作为一个技術科学工作者，除了掌握現有的数学方法以外，还必須經常注意数学方面的發展，要能灵敏地認出对技術科学有用的新数学，快速地加以利用。他也要不时对数学家們提出在技術科学中發現的数学問題，求得他們的協助，來解決它。自然我們也可以說，关于这一点，技術科学与自然科学各部門的研究沒有什麼大的差別。但是实际上技術科学中的数学演算一般要比自然科学多，数学对技術科学的重要性也就更明顯些。也因为技術科学中数学計算多，有时多得成了工作量中的主要部分，这使得許多技術科学的青年工作者誤認為数学是技術科学的關鍵。他們忘了数学只不过是一个工具，到底不过是一个“宾”，不是“主”。因此我們可以說：一件好的技術科学的理論研究，它所用的数学方法必定是最有效的；但我們决不能反过來說，所有用高深

数学方法的技術科学研究就都是好的工作。

也是因为技術科学研究工作中，用数学分析和計算的地方很多，所以許多具体分析与計算的方法，像攝动法、能量法等，都是技術科学研究中所創造出來的。这方面贡献特別多的是技術科学中的一个部門——力学。唯其如此，最近电子計算机的發展，就对技術科学的研究有深切的影响。因为电子计算机能以从前不可想像的速度進行非常准确的計算，有許多在以前因为計算太複雜而用实验方法来解决的問題，現在都可以用計算方法解决了，而且在時間方面以及所需的人力物力方面都可以比用实验方法更經濟。这一点說明了电子计算机在技術科学研究中的重要性。在將來，我們不能想像一个不懂得用电子计算机的技術科学工作者。但更要緊的是：由于电子计算机的創造，数字計算方法將更加多用，技術科学的研究方法將起大的变化。我們才在这改革的萌芽时期，而且电子计算机本身也在迅速地發展，將來到底能做到什麼地步，現在还不能肯定，能肯定的是：下一代的技術科学工作者的工作方法必定比我們这一代有所不同。

我們在前面已經說过：数学方法只是技術科学研究中的工具，不是真正關鍵的部分。那么，關鍵的是什麼呢？技術科学工作中最主要的一点是对所研究問題的認識。只有对一个問題認識了以后才能开始分析，才能开始計算。但是什麼是对問題的認識呢？这里包含确定問題的要点在哪里，什麼是問題中現象的主要因素，什麼是次要因素；哪些因素虽然也存在，可是它們對問題本身不起多大作用，因而这些因素就可以略而不計。要能做到这一步，我們必須首先做一些准备工作，收集有关研究题目的資料，特別是实验数据和現場观察的数据，把这些資料印入腦中，記住它，为做下一階段工作的准备，下一个階段就是真正創造的工作了。創造的过程是：运用自然科学的規律为摸索道路的指南針，在資料的森林中，找出一条道路來。这条道路代表了我們對所研究的問題的認識，对現象机理的了解。也正如在密林中找道路一样，道路决难順利地一找就找到，中間很可能要被不对头的踪跡所誤，引入迷途，常常要走向回头路。因为这个工作是最緊張的，需要集中全部思考力，所以最好不要为了查資料而打断了思考过程，最好能把全部有关資料記在腦中。当然，也可能在艰苦工作之后，發現資料不够完全，缺少某一方面的数据。那么为了解决問題，我們就得暂时把理論工作停下來，把力量轉移到实验工作去，或現場观察上去，收集必需的数据資料。所以一个困难的研究题目，往往要理論和实验交錯進行好几次，才能找出解决的途徑。

把問題認識清楚以后，下一步就是建立模型。模

型是什麼呢？模型就是通过我們對問題現象的了解，利用我們考究得來的机理，吸收一切主要因素、略去一切不主要因素所制造出來的“一幅圖画”，一个思想上的結構物。这是一个模型，不是現象本身。因为这是根据我們的認識，把現象簡單化了的东西；它只是形象化了的自然現象。模型的选择也因此与現象的内容有密切关系。同是一个对象，在一个問題中，我們着重了它本質的一方面，制造出一个模型。在另一个問題中，因為我們着重了它本質的另一面，也可以制造出另一个完全不同的模型。这两个不同的模型，看來是矛盾的，但这个矛盾通过对象本身的全面性質而統一起來。例如，在流体力学中，在一些低速流动現象中，空气是被認為不可壓縮的，無粘性的。在另一些低速流动現象中，因为牽連到附面层現象，空气又变为有粘性的了。在高速流动現象中，空气又变成可壓縮的了。所以同是空气，在不同的情況下，可以有不同的模型。这些互相矛盾的模型都被空气的本質所統一起來。

我們已經說过，在摸索問題關鍵点的时候，我們依靠自然科学的規律。这也說明技術科学的工作者必須要能徹底掌握这些客观規律，必須知道什麼是原則上可行的，什麼是原則上不可行的。譬如永动机就是不可行的。我們也可以說唯有徹底掌握了自然科学的規律，我們的探索才能不盲目，有方向。正如上面所說的，自然科学的規律是技術科学研究的指南針。

有了模型了，再下一步就是分析和計算了。在这里我們必須运用科学規律和数学方法。但这一步是“死”的，是推演。这一步的工作是出現在科学論文中的主要部分，但它不是技術科学工作中的主要創造部分。它的功用在于通过它才能使我們的理解和事实相比較；唯有由模型和演算得出具体数据結果，我們才能把理論結果和事实相对比，才可以把我們的理論加以考驗。

由前面所說的技術科学工作方法看來，也許有人要問：技術科学的研究方法又有什麼和自然科学研究方法不同的地方呢？我們可以說这里沒有绝对的差別，但是有很重要的相对差別。我們可以說以自然科学和工程技术來对比，工程技术里是有比較多的原始經驗成分，也就是沒有嚴密整理和分析过的經驗成分。这些东西在自然科学里一般是很少的，就是因为某一問題分析还不够成熟，不可避免地含有經驗成分，那也是自然科学家們要努力消除的。但在技術科学里就不同了。它包含不少的經驗成分，而且因为研究对象的研究要求的不同，这些經驗成分总是不能免的。因此这也影响了技術科学的研究方法，它在一定程度上是和自然科学的研究方法有所不同的。我們也可以从另

一个方面來說，技術科學是從實踐的經驗出發，通過科學的分析和精煉，創造出工程技術的理論。所以技術科學是從實際中來，也是向實際中去的。它的主要的作用是從工程技術的實踐，提取具有一般性的研究對象，它研究的成果就對那些工程技術問題有普遍的应用。也正因为如此，技術科學工作者必須經常和工程師們聯繫，知道生產過程中存在的實際問題。有時一個技術科學工作者也直接參加解決生產中發生的問題，以取得實踐的經驗。照這樣說，一個技術科學工作者的知識面必然是很廣闊的，從自然科學一直到生產實踐，都要懂得。不僅知識廣，而且他還必須要能夠靈活地把理論和實際結合起來，創造出有科學根據的工程理論。

有了工程理論，我們就不必完全依賴工作經驗，我們就可以預見，這正如有了天體力學的理論，天文學家們就可以預見行星的運動，預告日蝕、月蝕等天文現象。由這一點看來，工程理論又是新技術的預言工具。因而技術科學也能領導工程技術前進，是推進工程技術的一股力量，是技術更新、創造新技術所不可缺的一門學問。

三、力學與航空技術

我們現在舉一個技術科學對工程技術所起作用的實例：航空技術。在這裡起重要作用的是力學這一個技術科學，這我們在前面也已經講到。力學對航空技術的貢獻是有決定性的，是技術科學與工程技術相互作用的典型。力學本身就成為技術科學的一個範例，也是我們現在對技術科學這一個概念的來源。

在古典的力學中有兩個重要的分支：一個是流體力學，一個是固體力學。流體力學是處理液體和氣體的運動的，所以它也包括了氣體動力學和空氣動力學。固體力學是處理固體在外力或加速度作用下所產生的應力應變，所以包括了彈性力學和塑性力學。顯然，流體力學與飛行器的外形設計和推進問題有密切關係，而固體力學則與飛行器的結構設計有密切的關係。自然我們認識到流體力學也必然與許多其他工程技術有關係，像水利工程、蒸汽或燃氣渦輪，船舶的設計等。固體力學也必然與所有工程技術中結構強度問題有關係。但是因為在力學迅速發展的時期中，也就是過去這五十年，只有航空技術上的問題最迫切、最嚴重，所以與力學相互作用最強的是航空技術，而不是上面所說的其他工程技術。

在飛機設計中一個基本問題是升力和阻力。升力是飛行所必需的，然而有升力就必然產生阻力；怎樣才能在一定升力下減少阻力呢？這也等於問：什麼是一定升力所產生的最小阻力呢？流體力學的偉大科學家 L. 普朗特耳在受了蘭開斯特耳意見的影響下，創

造了著名的有限翼展機翼理論，給出了計算由升力產生的阻力的方法，這就是所謂感生阻力公式。普朗特耳的研究也指出了減少阻力的方法，他的公式說在一定升力係數下，感生阻力係數是與翼展比成反比的。因此要減少感生阻力，我們就應該加大翼展比，也就是把翼面作得狹而長。

感生阻力的問題解決了，接着下面的問題就是不由升力所產生的阻力了，也就是所謂寄生阻力。這一部阻力是由於空氣的粘性而來的。空氣的粘性很小，但是它並不等於零。怎麼樣來考慮小粘性所產生的作用呢？這也是流體力學對航空技術的一個大貢獻。它指出小粘性的作用是局限於附在表面一層氣流中，也就是附面層中。流體力學也給出分析附面層的方法；並且指出：附面層有時會因為沿着表面在流向壓力增加，感到運動的阻礙，因而從表面分離出去。這樣分離了的附面層就造成渦流，減少了升力，加大了阻力。這些流體力學上研究的結果不但給設計飛機翼形和飛機輪形以原則性指導，而且指出，要減少寄生阻力，我們就必須減小附面層的面積，也就是減少表面面積。由於這一結果，飛機的設計才由多翼面的、帶支面外形，走向單翼面、完全流綫型化了的外形。

製造完全流綫型化的單翼飛機，不能再用不堅固的舊的、鋼架蒙布式的結構，而必須改用全金屬薄殼結構。但是這是一種新型的結構，工程師們沒有足夠的經驗，要能設計出有高效能的結構，這還是需要教彈性力學家們。他們首先給出計算薄殼結構的折負荷或臨界負荷的方法，也就是解決彈性穩定問題。雖然早在十九世紀歐拉就研究過這個問題，給出細梁臨界負荷的公式；但是飛機上用的結構要比這複雜得多，而且薄殼是有表面曲度的，古典的、所謂小撓曲理論是不正確的，它給出過高的臨界負荷。在另一方面，有些表面曲度小的結構，雖然折屈了，但是仍能担起更大的負載。所以彈性力學家們也還研究了結構在超越臨界負荷的情況，也就是解決了所謂“有寬度”的問題。這一連串的研究都是在 1933 年前作的，因此奠定了全金屬飛機結構的理論基礎。

在這裡我們必須說明的是：結構強度的問題總是要牽連到材料破壞問題上去的，因為強度就是在破壞的時候的負載，而且對金屬材料來說，在未破壞前，也必先進入塑性變形階段，因此也要牽連到塑性力學的問題。一直到現在，材料強度問題與塑性力學問題都在研究着，但都還沒有得出定論。所以自然科學的已知規律顯然還不能完全包括工程技術上的現象。但是力學工作者並不因此而放棄對結構強度問題的研究。他可以一面用彈性力學的理論，一面吸取工程實踐上的經驗或實驗的結果，把它們綜合起來，

造出有科学根据而又有实际意义的結構理論，这种在

现实条件下争取有用的理論的精神，是技術科学工作者所不可缺的。

由于上面所說的这些發展，在第二次世界大战中，飞机的时速已經达到了700公里，接近了声音傳播的速度(約每小时1000公里)。当时因为初步实验上發現物体阻力在声速附近急驟加大，在工程师中間也有人以为要飞机超过声速是不可能的，說存在着声速的牆。就在这时候，「气体动力学家們作出了翼面和机身在超声速气流中的运动理論，設計了超声速的風洞，作了許多超声速气流的实验。他們用理論和实验双方並進的方法証明超声速飞机的阻力系数实际上不会太大，所以並沒有所謂声速的牆。在另一方面，气体动力学家也参加了噴气推進机的創造和發展，大大地增高了飛行推進机的效能，因而减少它的重量。力学家的这些貢獻，促成了超声速飛行的实现。这一关一打破，航空的發展更快了。現在流体力学家正在努力于高超声速气动力学和稀薄气体动力学的研究，帮助超高空、超高速飛行的实现；因而也在促進星际航行的誕生。

因为技術科学的研究对象是具有一般性的，它的研究成果也有廣泛的应用。力学的工作，虽然是由于航空技術迫切的要求，但是，現在已經得到的流体力学和固体力学的研究結果，对其他工程技術部門來說也有很大的帮助。例如燃气輪机的創制成功是离不开气体动力学的；而掌握了高速气流动力学以后，我們也就很自然地看到把高速化学反应应用到化学工業中去的可能性。这些力学在航空技術以外的应用对將來的工程技術都是非常重要的。它也說明了，通过技術科学研究中的总结，一个技術部門的經驗与成就就能超越它們的局限性，伸展到其他方面去，推進了另一些技術部門的發展。技術科学家也是利用这一可能性來予見新技術，指出工程技術下一階段的發展方向。

四、技術科学的一些新發展方向

我們在上一節中，約略地介紹了些几門技術科学的情况。但是流体力学、彈性力学和塑性力学都是比较成型的，已經有了不少工作的学科；現在，我們要談一談今后技術科学發展的几个方向，几个需要开拓的学科。为了簡明起见，我們制了一张表。表的第一欄是学科的名称。第二和第三欄是这个学科在自然科学抽用的部分和在技術經驗方面抽用的部分。这也就形成这个学科的资料，要从这两部分綜合起來創造出这门技術科学。第四欄是現在可以看出来的內容，也就是研究題目。第五欄是这门学科研究成果的应用，也因此可以表現出这门科学的重要性。我們从这个表里面可以看出第三欄的技術經驗組成部分和第五欄的应用方面常常是相同的，这又一次說明技術科学基本

上是从工程技術上來，到工程技術中去的学科。

這張表也許太簡單了，我們再來介紹一下各学科的大意。

化学流体力学 这是一門研究流体中有化学变化、热的發生和吸收的动力学。因为有化学变化，所以流体各部分的成分就不能一样，成分不一样就引起了各种擴散过程。自然，因为有热能的發生和吸收，也有溫度的不均匀性，有热傳導的問題。所以它基本上是一門比流体力学还要複雜的科学。

物理力学 这门技術科学的目的是由物質的微結構，原子、分子的性質，通过統計物理的方法來計算物質的宏觀性質，这里也包含材料強度的物理理論。这也就是說我們希望用計算的方法來得到工程用的介質和材料的性質。这是一个節省時間、人力和物力的很上算的方法。虽然近代物理和化学的成就是很大的，但是要完全靠它們來推演出物質的宏觀性質还是不可能的，在許多地方，我們要採用半理論半經驗的方法來解決問題。这也說明了物理力学的內容和研究方法与統計物理、物理化学、化学物理是有所不同的。物理力学要在这些自然科学的基礎上，更進一步地結合实际，求对工程技術有用的結果。

电磁流体力学 这是研究導電液体和气体在电磁場中的动力学。導電的液体是液体金屬，它們在核子反应堆中常常被用为冷却剂。要傳送液体金屬可以用一种电磁泵，泵里面完全沒有轉动的机件，只靠轉动的电磁場來推动液体金屬。導電的气体是离子化了的气体，也就是高溫的气体(在一万度以上的高溫)。这种高溫在超高速飛行器的附面层里可以出現；这里的問題是怎样才能有效地冷却表面，不使它的溫度过分昇高。

流变学 流变学研究特別液体的动力学。这类液体的应力应变关系要比普通液体(像水)複雜得多，它包括膠体、油漆等。这门技術科学已經有多年的歷史，只不过这方面的工作做得不够。譬如一方面我們可以用仪器測定油漆的各种性質，一方面我們对油漆也有些具体的要求，像用刷子刷上油漆，过后要不顯刷子的印跡。但是現在的流变学就还不能把这两件事連起來，明确要什么样的物理性質才能滿足具体要求。要做到这样，就是流变学今后發展的主要方向。

土和岩石力学 我國現在正在進行大規模的基本建設，在土石工程中累積了不少經驗，在大爆破作業中也學會了先進操作方法。但這些都還沒有作出科学的总结，創造出土壤和岩石移动工程的理論，这是不應該的。土和岩石力学的研究任务就是要补足这个缺陷。此外我們也要研究电流对土壤的影响，土壤中的电流問題等。

技術科學的幾個發展新方向

部門學科	組 成 部 份		研究的內容	成果的应用
	自然科學和技術科學方面	工程技術方面		
化學流體力學	1. 流體力學, 氣體動力學 2. 化學動力學	1. 化學工業 2. 冶金工業 3. 工業中燃燒裝置	1. 有化學變化的流體運動 2. 固定和流體化的觸媒床 3. 燃燒和爆震 4. 沖激管中的化學作用	1. 化學工業 2. 冶金工業 3. 工業燃燒問題 4. 內彈道問題
物理力學	1. 物理化學, 化學物理 2. 量子力學, 統計物理 3. 固體物理	1. 化學工業 2. 材料研究	1. 氣體、液體、固體的熱工性質 2. 固體材料強度及變形問題 3. 物質在不可逆過程中的性質 4. 氣體在超高溫中的性質	1. 一般工程技術 2. 高溫技術
電磁流體力學	1. 流體力學 2. 電磁學 3. 電子物理 4. 天文观测	1. 超高速飛行技術 2. 原子能技術	1. 電磁流體的運動規律	1. 超高速飛行技術 2. 原子能技術
流變學	1. 流體力學	1. 油漆、食品工業等 2. 高分子化合物工業	1. 流變體測量方法的分析 2. 流變體運動規律	1. 輕工業生產技術和輕工業產品的改進 2. 超高压滑調劑和軸承
土和岩石力學	1. 固體動力學, 固體力學 2. 強度理論	1. 挖土工程 2. 隧道工程 3. 爆破工程 4. 探礦工程	1. 土和岩石的物理性質 2. 爆破的動力學過程 3. 土壤加固問題	1. 土石工程 2. 探礦工程 3. 爆破工程 4. 挖土機械的設計
核子反應堆理論	1. 核子物理, 中子物理 2. 熱傳導	1. 原子能利用	1. 反應堆理論, 反應堆動態性能	1. 原子能利用
工程控制論		1. 隨機械, 工業控制系統 2. 自動化生產方法	1. 各種控制系統的分析 and 綜合 2. 自動測量的系統 3. 自動校正的系統	1. 工業控制系統 2. 生產過程自動化
計算技術	1. 數理邏輯 2. 控制論	1. 自動控制系統 2. 電子工藝學	1. 模擬計算機 2. 數據計算機 3. 复合計算機	1. 科學問題的計算 2. 自動控制系統
工程光譜學	1. 物理光學, 各種光譜 2. 量子力學, 統計物理	1. 工業分析儀器	1. 光譜分析 2. 質譜分析 3. 輻射在不均勻氣體混合物中的規律	1. 工業分析 2. 生產過程自動化中的控制測量
運用學		1. 工程標濟 2. 經濟規則 3. 運輸規則 4. 生產規則	1. 綫形規則, 動態規則 2. 運輸問題 3. 排隊問題	1. 工程標濟 2. 經濟規則 3. 運輸規則 4. 生產規則 5. 產品系列化問題

核子反應堆理論 這門技術科學的內容是設計核子反應堆的理論, 幾年來這方面的工作一直是核子物理學家兼任的, 現在應該把這部分工作計劃為技術科學的一個部門, 不再去麻煩物理學家。

工程控制論 這是生產過程自動化和自動控制系統的基本理論。它比一般所論自動調節和远距离操縱理論的範圍要廣, 而它也正在引用最近系統數學的成就來更進一步擴大它的領域, 為設計更完善的自動控制系统打下基礎。

計算技術 這學科是為了設計更好的、多種多樣

的电子計算計, 和更有效地使用电子計算機。現在在這一個方面工作的有無線電电子工程師、电路網絡專家, 也有計算數學專家和數理邏輯家。如果只把這些不同專業的人放在一起, 他們只形成一個“混合物”, 是不会有成效地共同工作的。只有當這幾方面的專家互相了解, 互相貫通了他人的專業以後, 也就是說結合起來成了“化合物”以後, 這才能推進电子計算機的發展, 作到這一步也就是把他們各個不同的專業變成一個共同的專業——計算技術這一門技術科學。

工程光譜學 要把生產過程自動化, 就要能迅速

地、精确地知道生产过程每一部分的情况，作为控制的依据。在许多化学工业、冶金工业和燃烧过程中，最主要的测定就是物质成分的分析。最快最准的测定方法就是光谱分析法和质谱分析法，而且这些分析的一套仪器也能自动化，不经过人的操作，就能将分析的结果传输到过程的控制系统中去。怎么样来设计这种自动仪器？这需要理论。此外，现在我们只知道怎样处理均匀气体的光谱，如果我们更进一步处理不均匀气态的光谱，像一个火焰的光谱，用这样的光谱分析出其中每一点的不同成分，那就需要更进一步来发展光在物质中传导的理论。这些问题就是工程光谱学的研究对象。

运用学 这门技术科学工作的内容是用近代数学的成就，特别是统计数学的成就，来研究最有效地使用人力、生产工具、武器、物资等等的方法和安排，也就是把一切规划工作放在科学的基础上。自然，以前作规划工作的人们也引用了些数学，但是因为用的数学方法是很初级的，工作的范围受了很大限制，所以不能够彻底解决问题。运用学就是要用最有效的数学方法来突破这个限制，创造出作规划的一般方法，建立起规划的理论。我们可以看到，运用学研究中所出现的因素与一般科学有所不同。它不研究物质的能量和动量，也没有什么动力学问题。运用学专考究一个组织、一个系统的运用效果，和组织间与系统间的消长关系。

我们在附表里和前面各节中介绍了些技术科学的发展新方向，有的是新的学科，有的是老学科但是要朝新的方向走。这里必须说明的是，由于个人知识的限制，我不可能把所有发展的方向都罗列出来，列出来的是不完全的，而其中有一半是和力学有关的。显然还有许多别的学科没有列出来，举一个例，现在物理学家研究半导体，但是他们研究的重点是半导体在电子器件和电力技术上的应用，所以这样的一门学科实在是一门技术科学。此外也很显然地，说这些是发展的新方向，并不等于说老一点的技术科学部门就没有前途，不必发展了。人们的知识是要永远前进的，不会走到终点的。而且任何在这些旧部门工作的人，任何流体力学家、弹性力学家、塑性力学家，都知道在他们自己专业里面还存在着——一连串的问题等待解决，这些问题也对工程技术有密切关系，不容忽视。

五、技术科学对其他科学的贡献

我们在前面已经提到自然科学、技术科学和工程技术之间的相互影响和相互提携，这也就是说，我们不能只看到自然科学作为工程技术的基礎这一面，而忽略了反过来的一面，一个反馈作用，也就是技术科学对自然科学的贡献。为什么有这一个可能性呢？我

们在第一節里就说明为什么自然科学是不可能尽善尽美的，不可能把工程技术完全包括进去；而技术科学却能把工程技术中的宝贵经验和初步理论精炼成具有比较普遍意义的规律，这些技术科学的规律就可能含有一些自然科学现在还没有的东西。所以技术科学研究的成果再加以分析，再加以提高就有可能成为自然科学的一部分。这里的一个明显例子就是工程控制论。工程控制论的内容就是完全从实际自动控制技术总结出来的，没有设计和运用控制系统的经验，决不会有工程控制论。也可以说工程控制论在自然科学中是没有它的祖先的。但是工程控制论一搞出来，我们很容易看到它的应用并不局限于人为的控制系统。在自然界里，生物的生长和生存都有它们自己的相应控制系统；而这些自然控制系统的运行规律也是依照工程控制论中的规律的。所以工程控制论中的一些规律，必然是更广泛的控制论的一部分，而这个更广泛的控制论就是一切控制系统（人为的和自然的）的理论，它也必然是生物科学中不可缺少的，是生物科学的一部分。现在有些人认为从前生物学家因为没有控制论这一工具，所以只看到了生命现象中的能量和物质运动问题，没有注意到更关键的控制问题，因而歪曲了实际，得不到深入的了解。由此看来，一门技术科学，工程控制论，对一门自然科学，生物科学，是有非常重要的贡献的。

其实技术科学对其他科学的贡献还不限于自然科学。我们来看一看运用学。这门学科也是在自然科学领域里没有祖先的。它是由于改进规划工作的实际需要而产生的。规划工作中的工程经济、运输规划还可以说是工程技术，而生产规划就已经有点出了工程技术的范围，部分地踏入社会科学的领域中去了。现在运用学的历史还太短，内容还不丰富，但是我们肯定，再过些时候，当运用学有了进一步的发展以后，它的应用范围必定会更扩大，会更向社会科学部门伸展。我们这样说是有原故的。考虑一下社会科学中的一个重要部门——政治经济学对社会主义部分有些什么研究的题目，这里有关运用学的至少有下列几个：

（一）国民经济各部门间的关系，也就是生产生产资料的部门和生产消费资料的部门之间的关系，工农业生产部门和交通运输部门之间的关系，生产部门和商业部门、物资供应部门、财政金融部门等等之间的关系。

（二）各地区间的关系，也就是在一个社会主义国家里面，因为各个地区人口条件和自然条件的差别，造成在某种程度上的地区相对独立性，不可能每一地区都完全平衡，每一地区都和其他地区有同样的发展程度，这里就产生了地区间的关系。

(三)社会主义国家和别的国家的经济关系,也就是社会主义国家之间的关系和社会主义国家与资本主义国家之间的关系。

上面这些经济关系的分析和研究可以用一个运用学里面的工具,线性规划来进行。自然,线性规划是一个初步的近似解法,但是运用学的发展自然会创造出更好的工具,像非线性规划和动态规划。所以我们相信一门技术科学,运用学,对政治经济学会作出很大的贡献。把政治经济学精确化,也就是把社会科学从量的侧面来精确化。

在这里我想应该附加一个说明。许多人一听见要把社会科学精确化一定会有意见,就要提出抗议说:社会科学是碰不得的,自然科学家也好,技术科学家也好,你们都请站开!我想这大可不必,但所以有些人会对社会科学的精确化有这样反应,也不是没有一定的理由。可能是因为怕如此一精确化,反而把社会科学搞坏了。在资本主义国家中也的确有一批所谓度量经济学*(Econometrics)家,他们的大本营在美国的芝加哥,目的是把数学的分析方法应用到经济学上去。他们已经搞了几十年了,但是没有搞出什么好结果,没有能解决经济上的什么问题。这是证明了经济学不能精确化吗?我想不是的。这些度量经济学家们的出发点是资本主义不正确的经济学说。用资本主义的不正确观点,怎样会得出与实际相符合的结果呢?如果度量经济学家成功了,那我们倒反而要担心了。我们知道引用数学不会把原则上不正确的东西变成正确,也不会把原则上正确的东西变成不正确,数学只是一个工具,一个加快我们运算的工具,使得我们的分析能够更深入,更精确。所以我们没有理由怕社会科学会因引用数学方法而搞坏了。

另一个对社会科学精确化的顾虑是怕社会现象中有许多因素不能确实的估计,因而认为精确化是不可能的。不能确实估计的因素可以在两种不同情况下出现,一种是统计资料不够;一种是因素本身确是不易于见的,例如工人劳动积极性。前一种情况是不应该有的,真正的困难倒是因为不采用数学分析方法,所以难以确定那一个统计数字是重要的,因而统计资料有不切实用的情形。至于第二种情况,因素的可能变动大,不易固定,我想也不是放弃精确化社会科学的理由;谁都承认社会科学不是毫无客观规律的学问,只要有规律,这些规律就可以在某种程度上用数来描述出来。如果一个因素不能固定,我们也可以不固定它,把它当作一个有某种统计性质的“随机变数”,也就是说标明这个因素不同数值的几率是什么,整个问题

的演算仍然可以精确的进行。而近代统计数学方面的發展,我們完全有条件来处理这种非决定性的运算,只不过计算的结果不是一定的某种情况,而是精确地算出各种不同情况的出现几率是什么。这对规划工作来说是正确的答案。而其实一件在起初认为不能用数字来描述的东西,只要我們这样地来做,我們就发现,通过这个工作能把我们的概念精确化,把我们的认识更推深一步。所以精确化不只限于量的精确,而更重要的一面是概念的精确化。而终于因为达到了概念的精确化也就能把量的精确化更提高一步。

再有一个反对把社会科学精确化的理由是說:社会现象中的因素如此之多,关系又如此之复杂,数学的运算怕是不能实行的。其实这一个理由现在也不成立了。现在我們已有了电子计算机,它的计算速度,远远超过人的计算速度,因此我們处理复杂问题的能力提高了千万倍,我們决不会只因为计算的困难而阻碍了我们的研究。

由此看来,我們没有理由反对把精密的数学方法引入到社会科学里。但是到底这样精确化又有什么好处呢?举个例:精确化了的政治经济学就能把国民经济的规划作得更好,更正确,能使一切规划工作变成一个有系统的计算过程,那么就可以用电子计算机来帮助经济规划工作,所以能把规划所需的时间大大地缩短。也因为计算並不費事,我們就能经常的利用实际情报,重新作规划的計算,这样就能很快地校正规划中的偏差和錯誤。我們甚至至于可以把整个系统放到一架电子计算机里面去,直接把新的统计资料输入计算机,把计算机作为经济系统的动态模型,那就可以经常不断的规划,经常不断的校正,这样一定能把经济规划提到远超过于现在的水平。所以我們可以做得好,通过了运用学把数学方法引用到社会科学各部门中去,我們就能把社会科学中的某些问题更精确地、更具体地解决。当然,也許现在的社会科学家会认为这样就把社会科学弄得不像社会科学了,但所以“不像”,即正是因为有了新的东西,有了更丰富的内容,正是因为社会科学里产生了新的部门,这有什么不好呢?

六、謝語

作者在寫这篇論文的时候中,把內容的一部或全部和中國科学院及中國科学院力學研究所的許多位同事討論过。因为有了这些討論,起先說得不清楚的地方說得更明白些了;起先說得不妥當而容易引起誤解的地方也就修正了。作者在这里对他們給的帮助謝意。

*也有人把 Econometrics 譯作技術經濟,但是從它的內容來看,這個譯名可能是不合適的。